

VESIHALLITUKSEN MONISTESARJA

1980:26

VESISTÖJEN SYVYYSSUHTEIDEN KARTTOITTAMISESTA ILMAKUVIEN AVULLA

Risto Kuittinen

VESIHALLITUKSEN MONISTESARJA

1980:26

VESISTÖJEN SYVYYSSUHTEIDEN KARTTOITTAMISESTA ILMAKUVIEN AVULLA

Risto Kuittinen

Vesihallitus
Helsinki 1980

VESIHALLITUKSEN
KIRJASTO

R22684A

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO
2. VEDEN VAIKUTUS SÄHKÖMAGNEETTISEN SÄTEILYN KULKUUN
3. ILMAKUVIEN KÄYTTÖ SYVYYSKARTOITUSTEHTÄVISSÄ
 - 3.1 Väri- ja sävyerojen perusteella tapahtuva syvyydenmäärittäminen
 - 3.2 Veden syvyyden mittaaminen stereoskooppisesti
4. TUTKIMUSAINEISTO JA MENETELMÄ
 - 4.1 Ilmakuvaukset
 - 4.2 Kenttämittaukset
 - 4.3 Filmien tiheysmittaukset
 - 4.4 Syvyyskäyrien piirtäminen autografilla
5. TULOKSET
 - 5.1 Syvyyden ja filmin tiheyden korrelaatio
 - 5.2 Syvyyskäyrän tulkitseminen ilmakuvista
6. TULOSTEN TARKASTELU
 - 6.1 Veden läpäisevyys, pohja ja vesikasvillisuus
 - 6.2 Filmityyppit, kuvaustapa ja kuvausaika
 - 6.3 Menetelmän soveltuvuudesta Suomen oloihin

VESISTÖJEN SYVYYSSUHTEIDEN KARTOITTAMISESTA ILMAKUVIEN AVULLA

Risto Kuittinen

1. JOHDANTO

Vesihallitus toteuttaa parhaillaan laajaa valtakunnallista sisävesien syvyyskartoitushjelmaa. Eräänä työn keskeisenä tavoitteena on myös järvien rantojen ja matalikkojen kartoittaminen riittävän tarkasti, koska ranta- ja matalikkoalueet ovat nykyisin tulleet vesistöjen virkistyskäytön lisääntymisen myötä entistä tärkeämmäksi. Tämä kartointi on monessa suhteessa hankalaa, jos ajatellaan työn tekemistä talvella tai kessällä tapahtuvalla kaikuluotauksella. Edellä mainituista syistä vesien tutkimuslaitos aloitti vuonna 1976 kokeilut matalien alueiden kartoittamiseksi ilmakuvien avulla. Muualla maailmassa työtä on myös tehty enemmän tai vähemmän kokeiluluontoisesti, joten aluksi tarkastellaan mahdollisuuksia ja menetelmiä joita ilmakuvat tarjoavat käyttäjälleen.

2. VEDEN VAIKUTUS SÄHKÖMAGNEETTISEN SÄTEILYN KULKUUN

Sähkömagneettisen säteilyn spektri ulottuu gammasäteilystä radioaaltoihin. Tässä tarkastellaan kuitenkin vain näkyvän valon ja lähi-infran alueen, 400...1100 nm, sähkömagneettisen säteilyn kulkua vedessä.

Auringosta lähtöisin oleva säteily käyttäytyy kuvan 1 esittämällä tavalla, kun se kohtaa veden. Jos tämän tulevan säteilyn säteilyvoimakkuus on $M(\lambda)$, saadaan veden pinnasta heijastuneen säteilyn radianniksi $L_{pi}(\lambda)$:

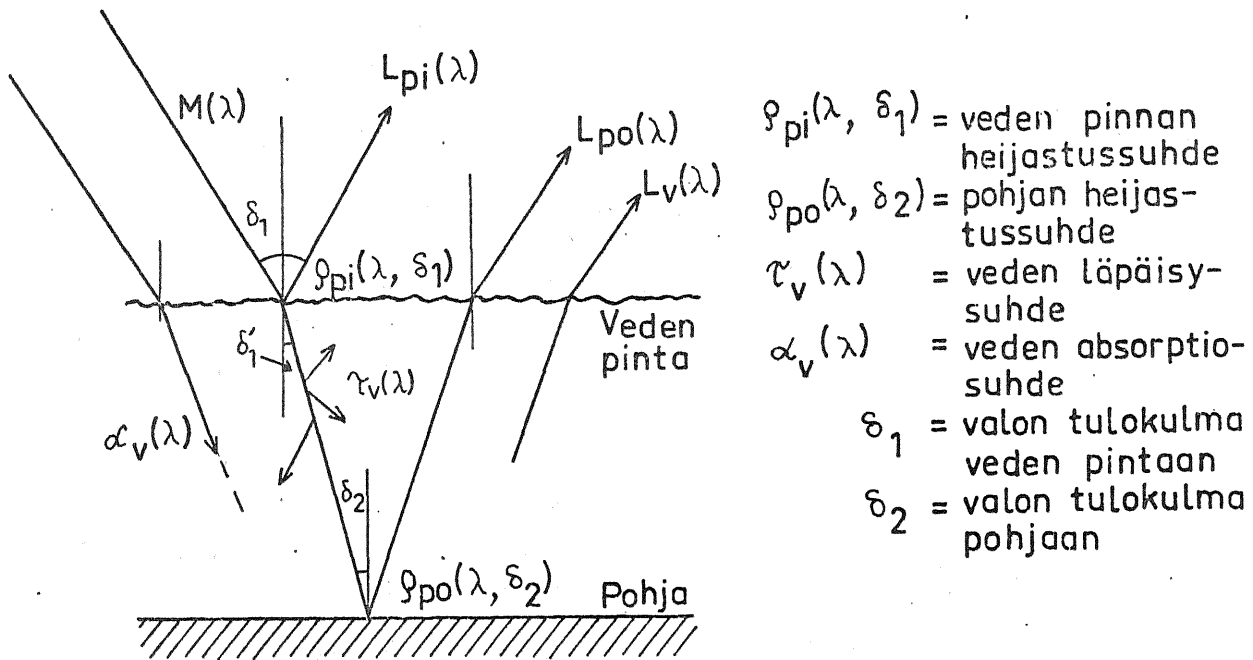
$$L_{pi}(\lambda) = \int M(\lambda) \cos \delta \rho_v(\lambda, \delta) d\lambda \quad (1)$$

Pohjasta heijastuneen säteilyn radianssi vedenpinnan yläpuolella on:

$$L_{po}(\lambda) = \int M(\lambda) \tau_v(\lambda) \rho_{po}(\lambda, \delta) \tau_v(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

Vesi itse aiheuttaa välillisesti myös säteilyä, joka syntyy tulevan säteilyn sirotessa vedessä. Tämän säteilyn suuruus veden pinnan yläpuolella on:

$$L_v(\lambda) = \int M_v(\lambda) \tau_v(\lambda) d\lambda \quad (3)$$



Kuva 1. Sähkömagneettisen säteilyn kulku vedessä.

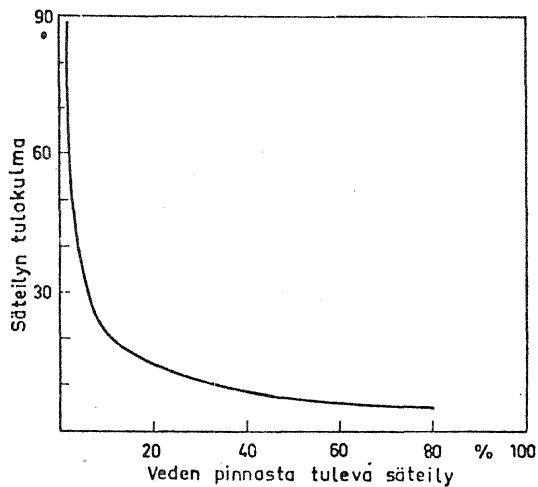
Veden syvyyden mittausta häiritsevät $L_{pi}(\lambda)$ ja $L_v(\lambda)$, koska ne häiritsevät pohjasta heijastuneen säteilyn mittausta. Tuleva säteily, $M(\lambda)$, muodostuu kahdesta komponentista, suoraan auringon aiheuttamasta komponentista $M_a(\lambda)$ ja auringon valon sironnan vaikutuksesta syntyvän ilmakehän säteilyn aiheuttamasta komponentista $M_i(\lambda)$. Näistä kahdesta komponentista $M_a(\lambda)$ on merkittävästi suurempi kuin $M_i(\lambda)$ ja voidaan yleisesti todeta, että ainoastaan suora auringonvalo antaa riittävästi säteilyä pohjan havaitsemiseksi.

Heijastuminen veden pinnasta

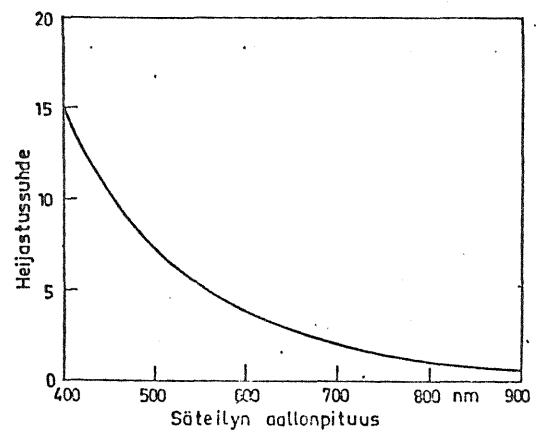
Säteilyn heijastumiseen vaikuttavat pääasiassa säteilyn tulokulma, säteilyn aallonpituus, polarisaatio ja heijastavan pinnan ominaisuudet. Polarisoitumattoman suoran auringonvalon heijastuminen $R(\lambda)$ voidaan laskea Fresnel'in lain mukaan:

$$R(\lambda) = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\delta_1 - \delta'_1)}{\sin^2(\delta_1 + \delta'_1)} + \frac{\tan^2(\delta_1 - \delta'_1)}{\tan^2(\delta_1 + \delta'_1)} \right] \quad (4)$$

Kuvassa 2 on esitetty veden pinnasta tapahtuvan heijastumisen ja takaisinsäteilyn määrä säteilyn tulokulman muuttuessa $/1/$. Säteilyn aallonpituuden vaikutus heijastumissuhteeseen $\rho_{pi}(\lambda, \delta)$ on esitetty kuvassa 3. Kuten huomataan lyhytaaltainen säteily heijastuu enemmän kuin pitkäaaltoinen $/2/$. Aallokko vaikuttaa heijastusta lisäävästi. Tulokulmasta ja aallokosta riippuen lisäys on noin 10...20 % $/1/$.



Kuva 2. Vedenpinnasta tapahtuvan heijastumisen ja takaisinsironnan määrä prosentteina tulleesta säteilystä /1/.



Kuva 3. Veden heijastussuhde säteilyn aallonpituuden funktiona /2/.

Säteilyn kulku vedessä

Sähkömagneettisen säteilyn tunkeutuessa veteen osa siitä siroaa ja osa jatkaa eteenpäin. Osa säteilystä myös absorboituu veteen. Veden läpäisevyyttä sähkömagneettiselle säteilylle voidaan kuvata yhtälöllä:

$$E(\lambda) = E_0(\lambda)e^{-k(\lambda)x}$$

(5)

, jossa $E_0(\lambda)$ on säteilytysvoimakkuus veden pinnalla

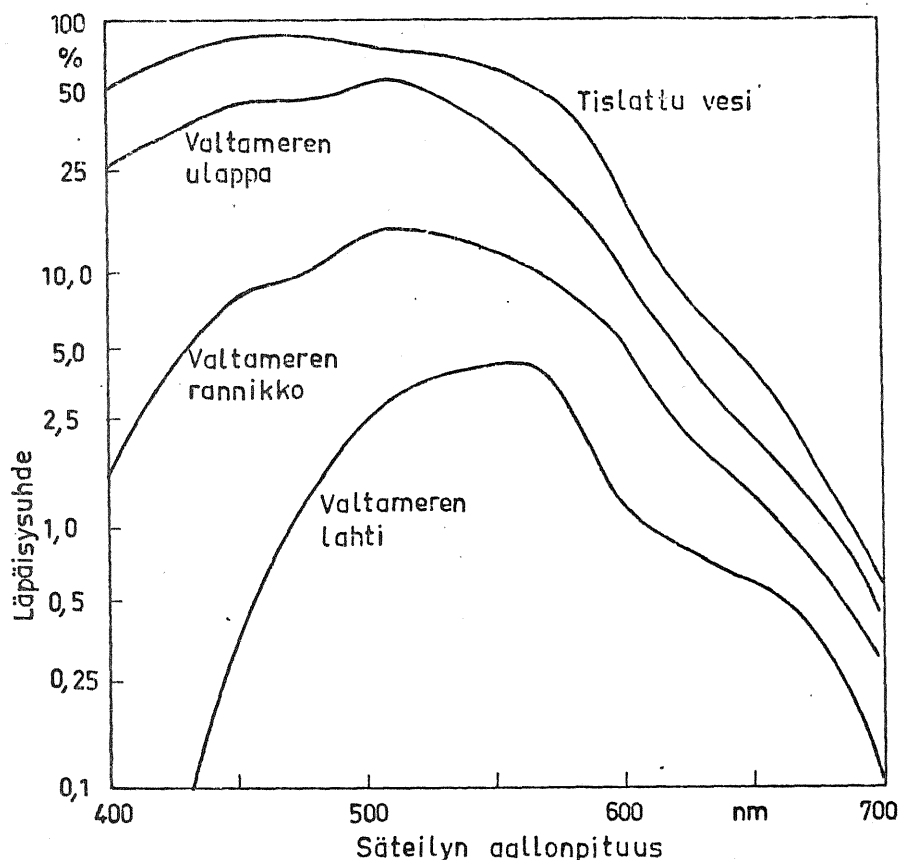
$E(\lambda)$ on säteilytysvoimakkuus syvyydellä x

$k(\lambda)$ on vaimennuskerroin

Vaimennuskerroin $k(\lambda)$ ottaa huomioon sekä veden aiheuttaman absorptio- että sironnan.

Luonnonvesien sähkömagneettista säteilyä vaimentava vaikutus johtuu kahdestakin eri syystä: veden itsensä (puhdas vesi) aiheuttamasta vaimennuksesta (sironna ja absorptio) ja vedessä olevien aineiden aiheuttamasta vaimennuksesta (sironna ja absorptio). Kuvassa 4 on esitetty erilaisten vesien valon läpäisevyyden arvoja $\tau(\lambda)$ valon aallonpituuden funktiona /3/. Kuten havaitaan, nimenomaan vedessä olevat vieraat aineet aiheuttavat merkittävää valon läpäisevyyden vähenemistä.

Vedessä tapahtuva sironna johtuu sekä vedestä itsestään että vedessä olevista hiukkasista. Veden itsensä aiheuttama sironna on lähes samanlainen erilaisissa olosuhteissa, kun sensijaan hiukkasten määrä ja koko vaikuttavat merkittävästi niiden aiheuttamaan sironnaan. Mitä suurempi on hiukkasten määrä ja koko, sitä suurempi on sironna. Sironnan suuruus riippuu myös tarkasteltavan valon aallonpituudesta siten, että ly-



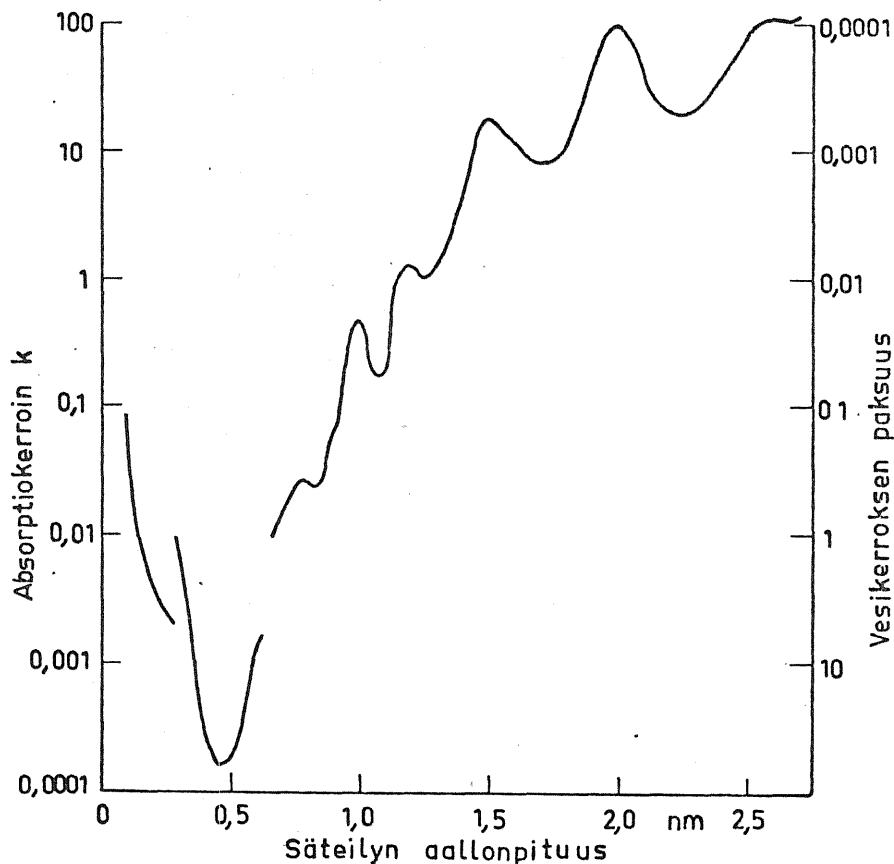
Kuva 4. Kymmenen metrin paksuisen vesikerroksen valon läpäisevyyden arvot eri vesityypeillä /3/.

hytaaltoisempi säteily siroaa enemmän kuin pitkäaaltoinen. Jos hiukkasen halkaisija on $\sim \lambda^{-4}$, on sironta voimakkainta lyhytaaltoisella alueella. Vesi näyttää siniseltä. Kun hiukkasen koko kasvaa, sironta tulee vähitellen riippumattomaksi aallon pituudesta ja veden "väri" muuttuu vihreän kautta keltaiseksi. Kun hiukkasia on hyvin runsaasti ja ne ovat suuria, saa vesi saman "värin" kuin siinä olevat hiukkaset.

Puhtaan veden absorptiokäyrä on esitetty kuvassa 5 /4/. Absorption $\alpha(\lambda)$ minimi sattuu noin 500 nm kohdalle. Absorptio lisääntyy vedessä olevien vieraiden aineiden vaikutuksesta.

Irradianssi pohjassa

Pohjan tasalla mitattu irradianssi antaa viitteitä siitä, näkyykö pohja veden päältä tarkasteltuna. Kuvassa 6 on esitetty eräitä havaintoja irradiansin määrästä säteilyn aallonpituuden funktiona /3/. Kuten havaitaan suurimmat irradianssin arvot on saatu 450...600 nm alueella veden laadusta riippuen. Kuvassa 7 on esitetty Tvärminnen Storfjärdenillä mitattuja vihreän valon valomääriä eri syvyyksillä eri vuodenaikoina /5/. Valomäärät vähenevät hyvin nopeasti syvyyden lisääntyessä varsinkin, jos vedessä on muita aineita.

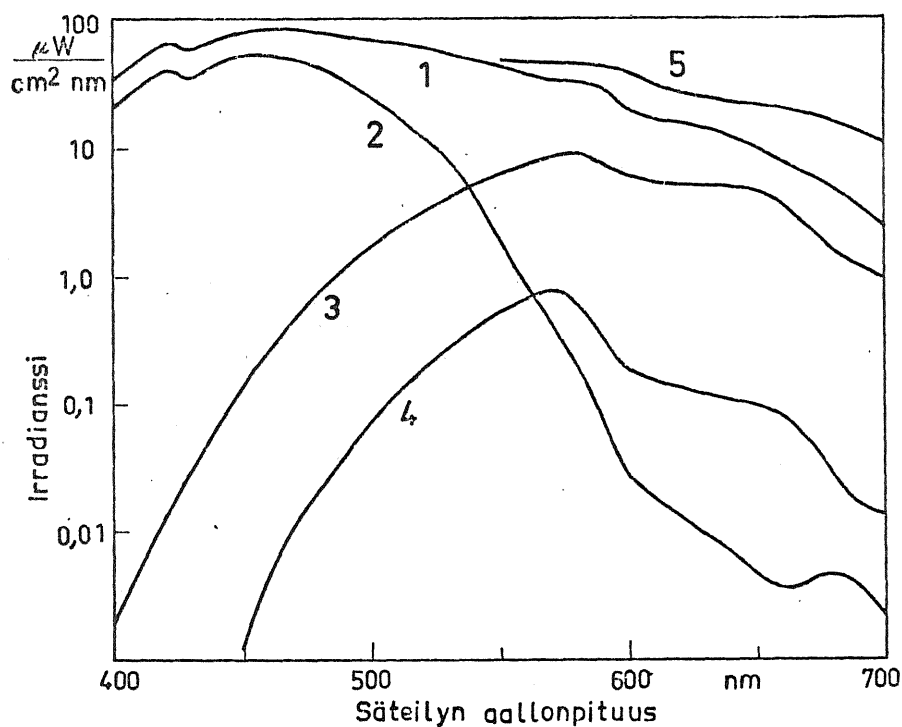


Kuva 5. Puhtaan veden absorptiokerroin säteilyn aallonpituuden funktiona /4/.

Valaistusolot Suomen vesistöissä

Suomen vesistöjen valaistusoloista on tehty suhteellisen vähän mittauksia. Elomaa /6/ on mitannut muutamien järvien osalta irradianssia veden alla sekä pohjasta ja veden pinnasta tapahtuvaa heijastusta. Alueella 440...700 nm oli yksi prosentti veden pinnalle tulleesta irradianssista jäljellä 2...6 m syvyydellä, kun sensijaan alueella 380...520 nm vastaava syvyys oli keskimäärin 2 m pienempi kuin ensinmainitulla alueella. Tulokset osoittavat, että vihreän ja punaisen valon alueella veden valonläpäisy on parempi kuin sinisellä alueella. Kuvassa 8 on Elomaan mittaamia järven pohjasta heijastuneen säteilyn arvoja aallonpituudella 385-700 nm prosentteina koko säteilystä 5 cm veden pinnan alla mitattuna /6/.

Taulukossa 1 on esitetty Järnefeltin /7/ mainitsemia näkösyvyyden keskimääräisiä arvoja erityyppisille Suomen järville. Kuten huomataan vaihtelurajat ovat hyvin suuret. Tämä johtuu sekä järvikohtaisista eroista että vuodenaikojen aiheuttamasta vaihtelusta.

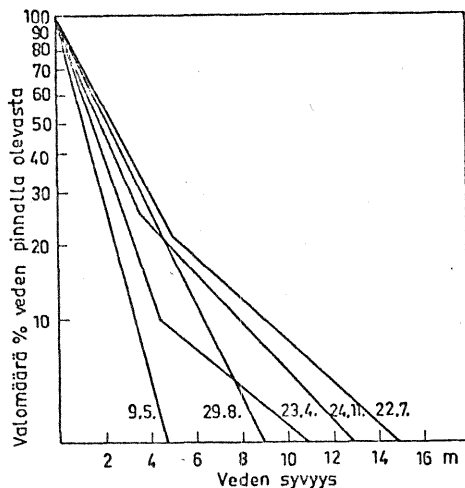


Kuva 6. Veden alla mitattu irradianssi $E(\lambda)$ eri syvyyksillä. 1 ja 2 Golf-virta 5 m ja 25 m syvyydellä. 3 ja 4 tekojärvi 5 m ja 10 m syvyydellä, sekä 5 luonnontilainen järvi 5 m syvyydellä /3/.

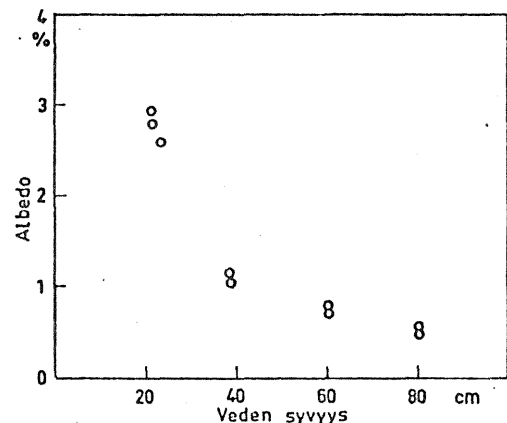
Taulukko 1. Näkösyvyyden keskimääräisiä arvoja erityyppisille Suomen järville /7/.

Järvityyppi	Näköisyys (m)	
	keskiarvo	vaihteluväli
eutrofinen	n. 1.8	0.4...4.0
oligotrofinen ja heikosti humusta sisältävä	n. 4.2	2.0...12.5
em. ryhmä Pohjois-Suomessa	n. 6.8	3.1...10.0
mesohumoosinen	n. 2.0	1.5...2.7
polyhumoosinen	n. 1.1	0.3...1.4

Järvien näkösyvyys vaihtelee vuodenajasta riippuen. Jäätömänä aikana näkösyvyys noudattaa yleensä seuraavaa kaavaa: Keväällä sulamisvesien tullessa järveen on näkösyvyys pienimmillään, kesällä näkösyvyys lisääntyy sedimenttien laskeutuessa pohjaan ja parhaat näkösyvyyden arvot saavutetaan yleensä heinä-elokuussa. Syksymmällä lisääntyvä sadanta aiheuttaa vesien samentumista. Taulukossa 2 on muutamien Suomen järvien näkösyvyyksien maksimien ja minimien sattumisajankohtia vuosina 1976...1978 tehtyjen näkösyvyysmittausten perusteella.



Kuva 7. Tvärminnen Storfjärdenillä v. 1959 mitattuja valomääriä /5/.



Kuva 8. Pohjan albedon arvoja eri vesisyvyyksillä 5 cm pinnan alla mitattuna Suomunjärnessä. Mittausalue 385...700 nm /6/.

Taulukko 2. Näkösyvyyden minimien ja maksimien ajankohtia eräissä Suomen järvissä vuosina 1976-1978.

Järven nimi	näkösyvyys (m)			
	minimi	aika	maksimi	aika
Lohjanjärvi	0.7	24.5.1976	4.0	15.8.1978
Hormajärvi	3.4	17.6.1976	7.2	18.8.1976
Hiidenvesi	0.5	13.5.1976	1.9	18.8.1976
Tuusulanjärvi	0.3	12.7.1976	0.9	15.8.1977
Pusulanjärvi	0.9	3.8.1978	1.4	12.8.1976
Kytäjäjärvi	1.1	3.8.1978	1.2	28.7.1977
Suininki	2.6	15.6.1976	4.3	4.8.1976

Koko näkyvän spektrin alueella näkösyvyys mitataan valkoiseksi maalatun levyn avulla. Voidaan olettaa, että levyn heijastussuhde on vain 60 %. Elomaan tulosten perusteella arvioiden irradianssista lienee noin 3-4 m syvyydellä jäljellä keskikesällä 1...5 %, jos kyseessä on suhteellisen kirkas järvi. Näin ollen noin 0.6...3.0 % järven pinnalle tulleesta säteilystä heijastuu takaisin saaden aikaan näköaistimuksen veden yläpuolella. Pohjan heijastussuhteen arvo vaihtelee 4...20 %, jos sen suuruutta arvioidaan maanpäällä mitattujen erilaisten maaperien heijastussuhteiden perusteella. Tämän perusteella pohjan näkösyvyys olisi pohjan laadusta riippuen noin 7...33 % levyllä mitatusta näkösyvyydestä, mikä merkitsisi suhteellisen kirkkailla järvillä noin 0.4...1.7 m näkösyvyyttä keskikesällä. Huonoissa olosuhteissa pohjan näkösyvyys jää muutama desimetriin ja hyvissä olosuhteissa ylittää huomattavasti edellä esitetyt arvot. Parempia pohjan näkösyvyyden arvoja saavutetaan, jos käytetään vain

spektrin vihreää ja punaista osaa. Edellä on esitetty käytännön mittaus-tuloksia ja perustelut niille. Voidaan olettaa että edellä esitetyn esimer-kin arvot pohjan näkösyvyydelle paranisivat noin 0.6...2.5 m spektrin aluetta 500...700 nm käytettäessä. Mikäli vesi on sameaa, kuten kevääl-lä yleensä on, ei tällaisiin pohjan näkösyvyyksiin päästä. Toisaalta hyvis-sä olosuhteissa saavutetaan merkittävästi suurempiakin arvoja.

3. ILMAKUVIEN KÄYTTÖ SYVYYSKARTOITUSTEHTÄVISSÄ

Vesialueiden syvyys-suhteita voidaan ilmakuvien avulla tehdä seuraavilla tavoilla:

- 1) Ilmakuvilla näkyvien väri- ja sävyerojen perusteella
- 2) Stereoskooppisesti mittaamalla
- 3) Aaltojen muodostaman tekstuurin avulla

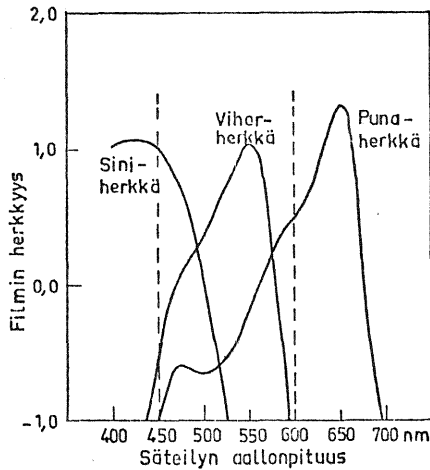
Näistä menetelmistä kaksi ensiksimmäistä ovat yleisimmät ja ainoat huomionarvoiset sisävesiämme ajatellen.

3.1 VÄRI- JA SÄVYEROJEN PERUSTEELLA TAPAHTUVA SYVYYDEN-MÄÄRITYS

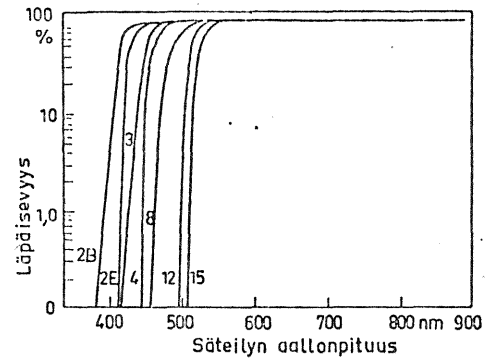
Tämän menetelmän suurimpana ongelmana on se, että valaistusolot, ve-den laatu ja pohjan heijastuskertoimet vaikuttavat suuresti pohjan havaitta-vuuteen. Näin ollen ei ole olemassa mitään yhtenäistä ja kaikkialle sovel-tuvaa menetelmää syvyys-suhteiden määrittämiseksi kuvien värin tai sävyn perusteella. Jokainen syvyydenmäärittäjä on oma ongelmansa ja sii-hen tulee tapauskohtaisesti soveltaa käytettävissä olevia menetelmiä. Kir-jallisuudessa on esitetty lukuisia tutkimustuloksia, joista mainittakoon /3/, /8/, /9/, /10/. Valtaosa näistä tutkimuksista käsittelee merialueel-la tapahtuvia syvyydenmäärittäjiä, koska näillä alueilla suuri näkösyvyys antaa paremmat edellytykset menetelmän käytölle. Parhaat tulokset on saatu erilaisia värifilmejä käyttämällä ja kuvausten yhteydessä on käytet-ty erilaisia keltasuotimia. Eräässä tutkimuksessa /11/ on käytetty väri-infrafilmiä syvyys-suhteiden havaitsemiseksi. Tässä tapauksessa tulos on mahdollinen heikon keltasuotimen vaikutuksesta, joka sallii myös siniher-kän infralle herkistetyn emulsiokerroksen valottumisen osittain sinisen valon avulla. Jotta syvyys-suhteita ylipäättänsä voitaisiin ilmakuvilta mää-rittää, täytyy vesistön pohja saada kuvautumaan filmille. Edellä on tehty selkoa siitä, minkälaiset olosuhteet vesistöissä vallitsevat ja miten vesi vaikuttaa sähkömagneettisen säteilyn kulkuun.

Nykyaikainen kolmiemulsioinen värifilmi on herkistetty valolle, jonka aallonpituus on välillä 380...700 nm. Kuvassa 9 on esitetty erään väri-filmin emulsiokerrosten herkkyyskäyrät. Kuten nähdään, jokaiselle pää-värin valolle on oma käyränsä. Edellä on todettu, että sininen valo ei ole kovinkaan sovelias syvyys-suhteiden mittaamiseen, koska se läpäisee huo-nosti useimpia vesiä. Tämän vuoksi siniherkälle kalvolle muodostuva ku-va häiritsee pohjan kuvautumista. Siniherkän kalvon valottumista estä-mään voidaan käyttää erilaisia keltasuotimia. Kuvassa 10 on esitetty

muutamien tyypillisimpien suodinten läpäisykäyrät aallon pituuden funktiona /3/, /11/. Yleissääntönä voidaan sanoa, että mitä sameampaa vesi on, sitä voimakkaampaa keltasuodinta tulee kuvauksessa käyttää.

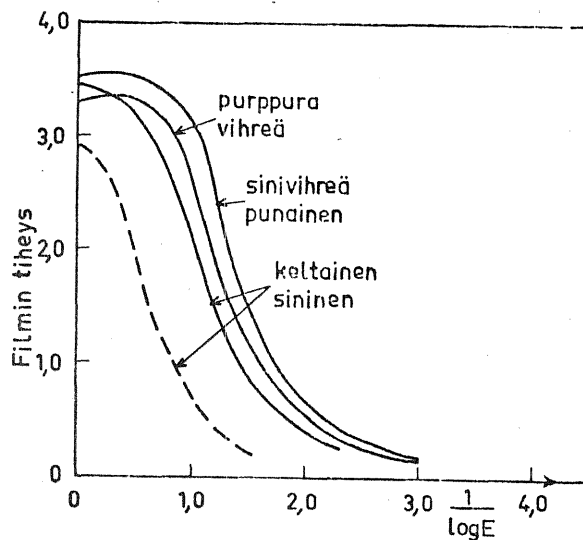


Kuva 9. Erään värifilmin herkkyyskäyrät. Kuvaan on merkitty katkoviivoin optimaalinen veden valonläpäisyalue /3/.



Kuva 10. Erilaisia Wratten-suodinten läpäisykäyriä /11/.

Kuvassa 11 on esitetty keltasuodimen käytön vaikutus väridiapositiivifilmin eri emulsiokerrosten mustumakäyriin. Vähenevä keltainen väri kuvalla aiheuttaa sen, että kuvan yleissävy muuttuu vihreän-punavoittoiseksi. Tämä värin poikkeaminen luonnollisesta ei vaikeuta tulkintaa, mikäli kontrastit kuvalla ovat riittävät.



Kuva 11. Kääntökehittävän värifilmin eri emulsiokerrosten mustumakäyriä.

3.2 VEDEN SYVYYDEN MITTAUS STEREOSKOOPPISESTI

Syvyys-suhteet saadaan ilmakuvia käyttäen luotettavimmin määritetyksi stereoskooppista mittausta käyttäen. Kuvassa 12 on esitetty veden pinnassa tapahtuvan sähkömagneettisen säteilyn taittuminen ja siihen liittyvät tekijät.

$$\Delta d = \frac{dh \left(1 - \frac{\tan \beta}{\tan \alpha}\right)}{H - h} \quad (6)$$

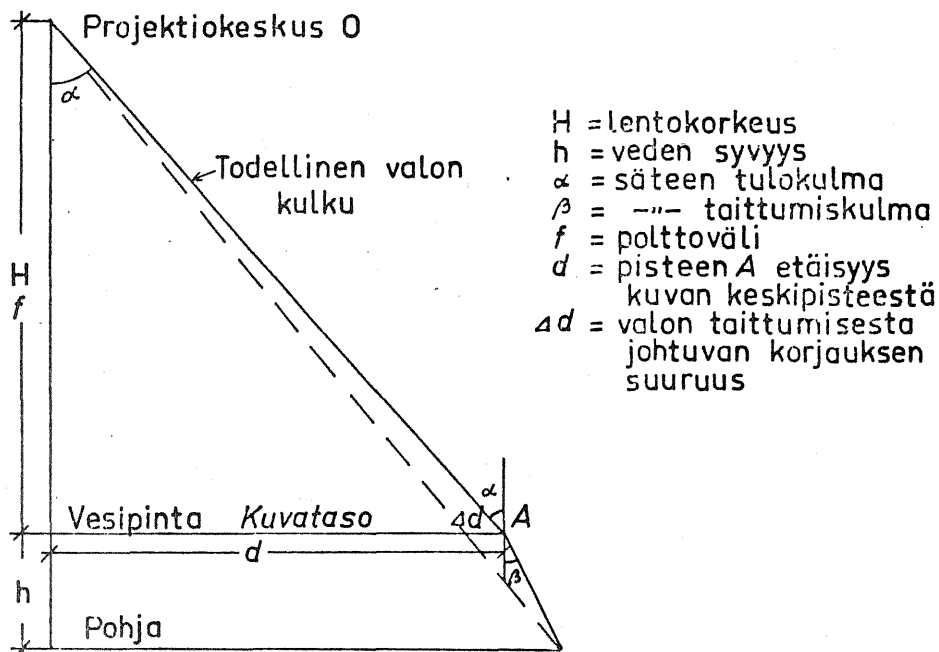
, jossa esiintyvät suureet ilmenivät kuvasta 12.

Kuvassa 15 on esitetty vedenalaisen kohteen stereoskooppinen havaitseminen. Todellisen syvyyden h ja näennäisen syvyyden h' väliselle suhteelle saadaan lauseke:

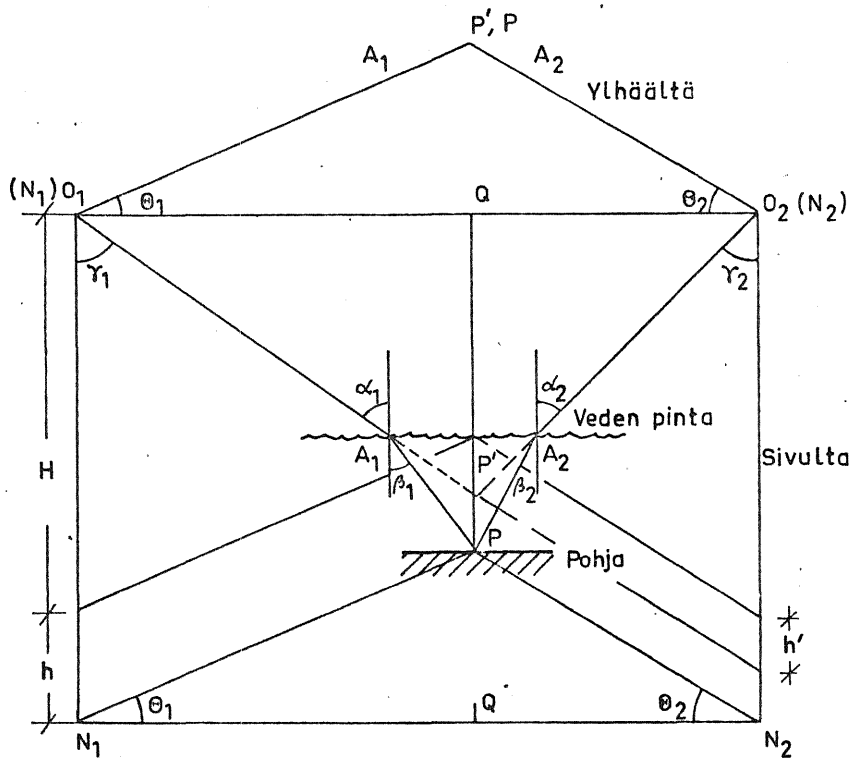
$$\frac{h}{h'} = \frac{\tan \alpha_1 \cos \theta_1 + \tan \alpha_2 \cos \theta_2}{\tan \beta_1 \cos \theta_1 + \tan \beta_2 \cos \theta_2} \quad (7)$$

, jossa $\alpha_i, i=1,2$ ja $\beta_i, i=1,2$ ovat säteen tulokulma ja taittumiskulma veden pinnan normaaliin nähden. Muut suureet ilmenivät kuvasta 13.

Kuten kuva osoittaa, saadaan pohjan mielivaltaisen pisteen todellinen paikka oikein, sensijaan mitattu syvyys on virheellinen lausekkeen (7) osoittamalla tavalla. Suhde $\frac{h}{h'}$ on korjauskerroin, jolla stereoskooppisesti mitatut syvyydet on korjattava, jotta saataisiin todelliset syvyydet. Korjauskertoimen suuruus vaihtelee kuvan eri osissa keskimäärin 1.3-1.5.



Kuva 12. Valon taittumisesta veden pinnassa johtuva pohjan kuvautumisvirhe filmillä.



Kuva 13. Vedenalaisen kohteen stereoskooppinen havaitseminen kamerat pisteissä O_1 ja O_2 , todellinen pohja pisteessä P ja näennäinen pohja pisteessä P' , h on veden syvyys ja h' on näennäinen syvyys. α_i ja β_i ovat kulmia tasoissa, jotka muodostavat kulmat θ_1 ja θ_2 tason $O_1 O_2 N_2 N_1$ kanssa.

Voidaan arvioida, että keskimääräinen korkeuskäyrän mittaustarkkuus stereokartoituskojeella työskenneltäessä on noin 0.3 % lentokorkeudesta. Jos sallitaan 0.3 m korkeusvirhe käyrää piirrettäessä, tämä merkitsee sitä, että kuvauskorkeuden tulisi olla noin 1000 m, mikä tavallista laajakulmakameraa käytettäessä merkitsee kuvamittakaavaa 1:6600. Syvyyskäyrää piirrettäessä on otettava huomioon valon taittumisen vaikutus, joka näennäisesti madaltaa syvyyksiä. Todennäköistä on, että keskimäärin mittakaavaltaan 1:5000 olevilta ilmakuvilta voidaan 1.5 m syvyyskäyrä kartoittaa riittävän tarkasti. Kuvausmittakaava on kuitenkin niin suuri, että kuvaus- ja kartoituskustannukset tulevat huomattavan suuriksi. Näin ollen Suomen oloissa syvyyskäyrien stereokartoituksella on merkitystä vain erikoistapauksissa.

4. TUTKIMUSAINEISTO JA MENETELMÄT

Tutkimusalueeksi valittiin suhteellisen tyypillinen järviolueen järvi Suontien Selkä, joka sijaitsee Suonenjoella. Järvi on kartoitettu Kuopion maanviljelysinsinööripiirin toimesta v. 1967. Osittaisia täydennyskartoituksia tehtiin tutkimusalueella syksyllä 1979 ja talvella 1980.

4.1

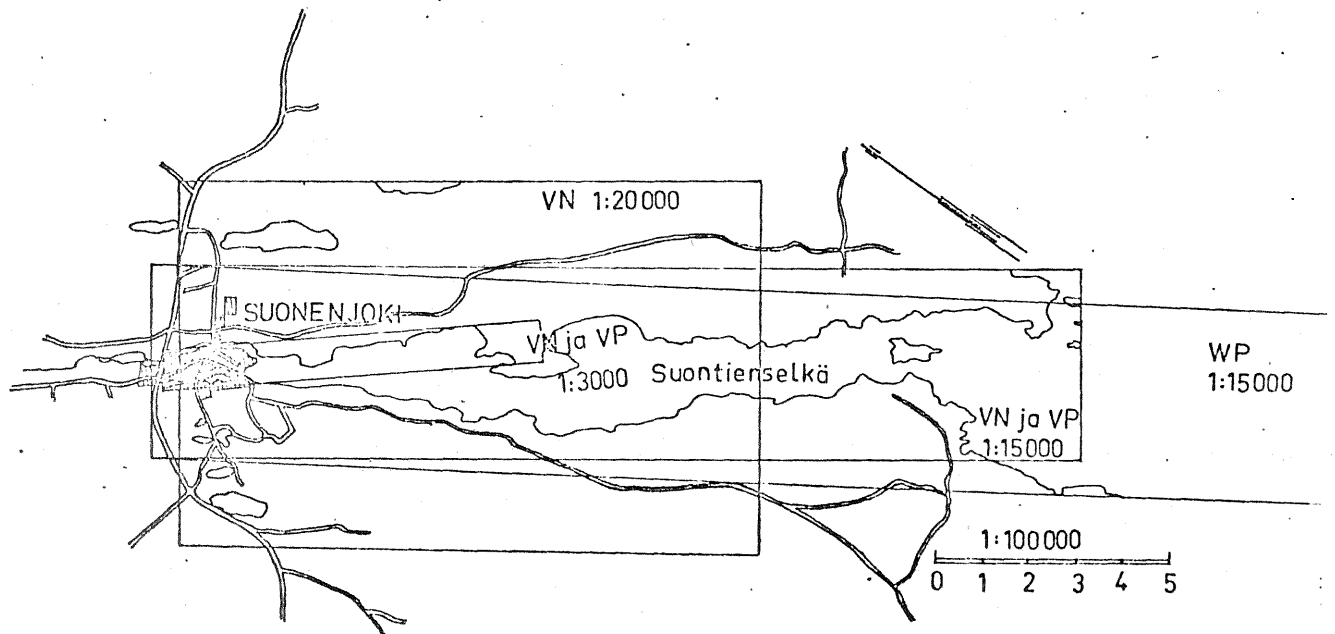
ILMAKUVAUKSET

Ilmakuvaukset tehtiin Topografikunnan toimesta kesinä 1976 ja 1978. Kuvausten ajankohdat ja muut kuvaukseen liittyvät tiedot ilmenevät taulukosta 4. Kuvauskamera oli Zeissin RMKA 15/23. Kameran aukko oli 5.6.

Taulukko 4. Suontienselällä kesinä 1976 ja 1978 tehdyt kuvaukset ja niissä käytetyt lentokorkeudet, filmit ja suotimet.

Kuvausaika	Käytetty filmi	Suodin	Mittakaava	Lento- korkeus (m)
3.8.1976 klo 10.	Water Penetratio		1:22000	3450
1.7.1978 klo 9.20	väridiapositiivi	Wratten 3	1:15000	2400
1.7.1978 klo 9.35	väridiapositiivi	Wratten 3	1:3000	550
1.7.1978 klo 10.30	värinegatiivi	Wratten 3	1:20000	3150
1.7.1978 klo 11.30	värinegatiivi	Wratten 3	1:15000	2400
1.7.1978 klo 12.30	värinegatiivi	Wratten 3	1:3000	550

Kokeilut väridiapositiivifilmillä ja värinegatiivifilmillä tehtiin siksi, että Kodak Company lopetti Water Penetration filmin valmistuksen ja toisaalta koetulokset /9/ osoittivat, että tavanomaisilla väریفilmimateriaaleilla saavutetaan lähes yhtä hyviä tuloksia. Kuvassa 14 on esitetty eri filmityypeillä kuvatut alueet Suontienselän pohjoispäässä.



Kuva 14. Suonenjoella tehdyt ilmakuvaukset.

4.2 KENTTÄMITTAUKSET

Ennen kuvauksia asetettiin vuonna 1976 0.2...4 m syvyyksille signaaleja yhteensä 16 kappaletta. Signaalit olivat ristosignaaleja, joiden sakarat olivat 0.4 m levyiset ja 2.5 m pituiset. Signalointi epäonnistui, koska kuvaus voitiin toteuttaa vasta yli kuukausi signaloinnin jälkeen ja näin ollen osa signaaleista oli ennättänyt hävitä. Vuonna 1978 signalointi uusittiin, mutta tällöin käytettiin ainoastaan 6 signaalia, jotka asetettiin 1.5 m syvyyteen.

Syksyllä 1979 kartoitettiin Suontienselän pohjoisosassa 1.5 metrin syvyyskäyrä ja talvella 1980 luodattiin 16 rannalta alkavalla linjalla pohjan profiili 4 m syvyyteen saakka.

4.3 FILMIEN TIHEYSMITTAUKSET

Filmin tiheys D määritellään seuraavasti:

$$D = \log_{10} \frac{1}{T}, \text{ jossa } T \text{ on filmin läpäisevyys. (8)}$$

Tässä tutkimuksessa mitattiin filmien tiheydet diffuusia densitometriä käyttäen pääesikunnan kuvakeskuksessa. Mittauksissa käytettiin sinistä Wratten 94, vihreää Wratten 93 ja punaista Wratten 92 suodinta, joiden läpäisevyysalueet sattuvat lähes keskelle vastaavien emulsiokerrosten spektristä herkkyyssaluetta. Lisäksi käytettiin yleissuodinta, Wratten 106. Mitatut tiheydet ovat integraalisia spektrisiä tiheyksiä eli kaikkien eri emulsiokerrosten vaikutus on mittaustuloksissa mukana. Näin ollen ei voitu aivan tarkasti selvittää erilaisen valon vaikutusta kuvien muodostumiseen vedenalaisista alueista. Mittaustuloksista saadaan kuitenkin pääpiirteissään selville myös se, mikä säteily parhaiten kertoo veden syvyys-suhteista. Mittakaavaltaan 1:3000 olevien väridiapositiivi- ja väri-negatiivifilmien tiheydet mitattiin pitkin edellä mainittuja 16 linjaa maastomittakaavassa 12 m välein siksi kunnes tultiin tilanteeseen, jossa tiheydet eivät enää mittaustarkkuus huomioon ottaen muuttuneet. Pienempi mittakaavaisilla filmeillä mitattiin syvänveden (syvyys yli 4 m) ja matalan veden (syvyys n. 0,7 m) antamat tiheydet.

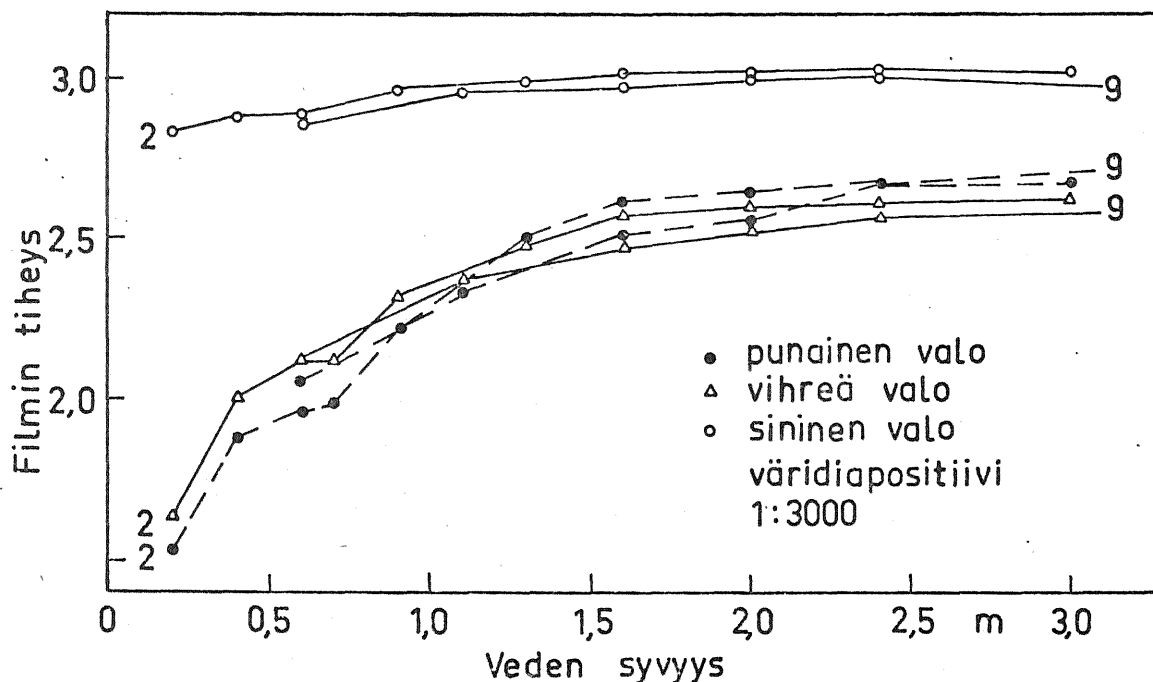
4.4 SYVYYSKÄYRIEN PIIRTÄMINEN AUTOGRAFILLA

Puolentoista metrin syvyyskäyrän tulkinta ja piirtäminen peruskartan originaalille 1:10000 tehtiin Wild'in A8 autografissa. Teknillisen korkeakoulun fotogrammetrian laitoksella. Käyrän sijainti tulkittiin Water Penetration filmiltä, väridiapositiivifilmiltä (mittakaava 1:15000) ja väri-negatiivifilmiltä (mittakaava 1:15000). Mallien orientointi ei laajojen vesipintojen vuoksi täysin onnistunut, joten esitettävät tulokset eivät ole aivan sitä tarkkuusluokkaa, johon hyvän orientoinnin avulla normaalisti päästään. Tulkinta tehtiin sävyerojen perusteella.

5. TULOKSET

5.1 VEDEN SYVYYDEN JA FILMIN TIHEYDEN KORRELAATIO

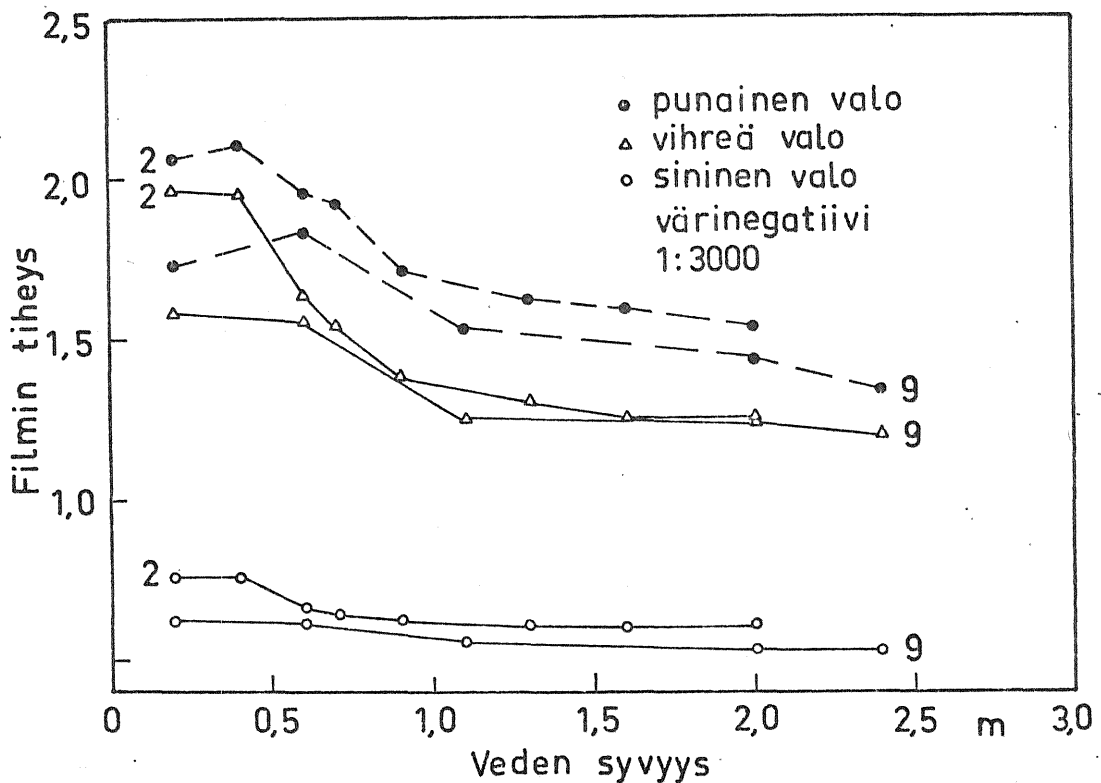
Kuten ennakkoon oli odotettavissa, ei sinisen valon avulla saada kovinkaan hyvin tietoa pohjan syvyyssuhteista, sensijaan vihreä ja punainen valo kertovat enemmän. Kuvissa 15 ja 16 on esitetty kahden tutkimusprofiilin syvyyssuhteiden ja filmeiltä mitattujen tiheyksien välinen riippuvuus. Kuten huomataan, selvin muutos tapahtuu pienillä vedensyvyyksillä.



Kuva 15. Eri emulsiokerrosten integraaliset tiheydet vedensyvyyden funktiona väridiapositiivifilmiltä mitattuna. Kuvauskorkeus 550 m. Hieta- ja hiesupohja, kohteet 2 ja 9.

Alla olevassa taulukossa on esitetty eri korkeuksilta kuvattujen värinegatiivifilmien tiheysmittauksiin perustuen noin 1 m syvyydellä olevan pohjan ja syvän veden välinen kontrasti filmillä.

Lento- korkeus (m)	kontrasti		
	sininen	vihreä	punainen
550	1.08:1	1.22:1	1.23:1
2400	1.04:1	1.12:1	1.23:1
3150	1.12:1	1.23:1	1.39:1

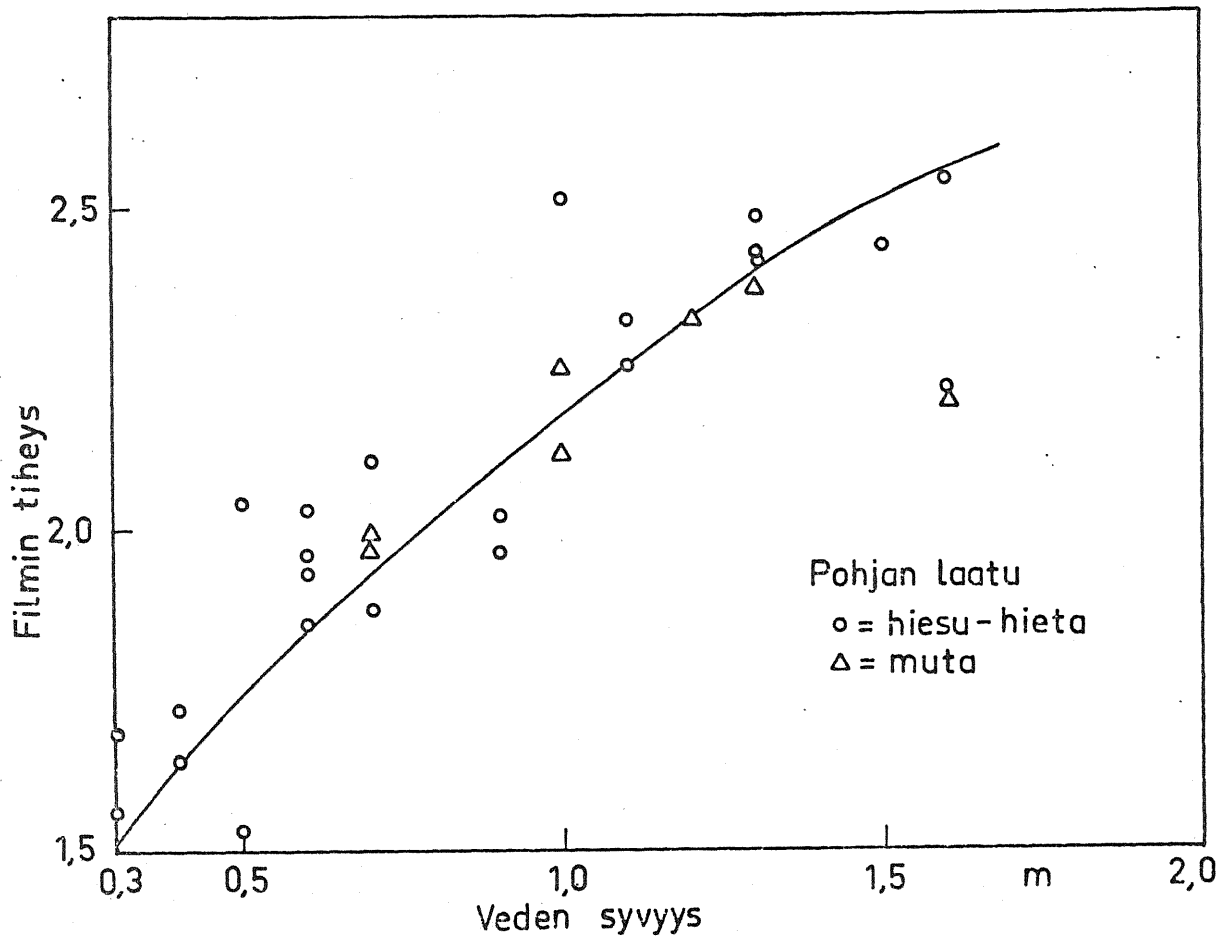


Kuva 16. Eri emulsiokerrosten integraaliset tiheydet veden syvyyden funktiona värinegatiivifilmiltä mitattuna. Kuvauskorkeus 550 m. Hieta- ja hiesupohja, kohteet 2 ja 9.

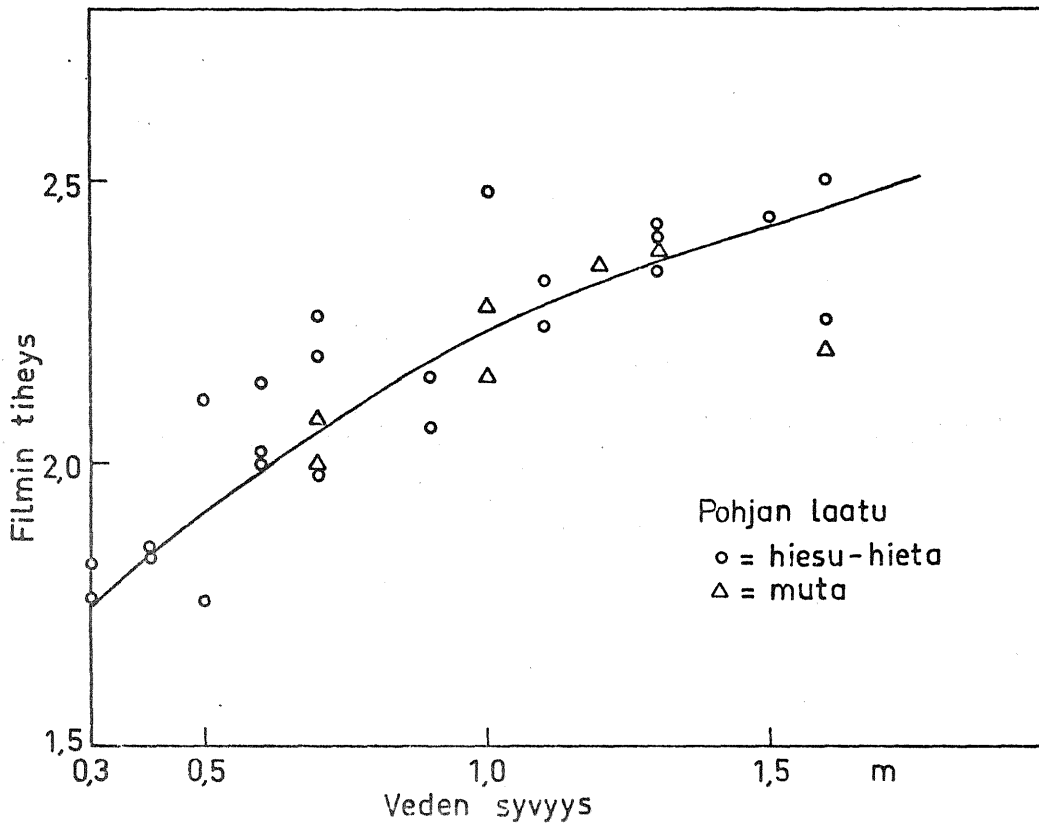
Kuten havaitaan kontrasti ei huonone tässä tapauksessa kuvauskorkeuden kasvaessa. Tämä johtuu suhteellisen voimakkaan keltasuotimen käytöstä kuvauksessa. Pienin ihmissilmän havaitsema kontrasti kuvilla oli noin 1.05:1, joten edellä esitetyt kontrastit olivat helposti visuaalisesti havaittavissa.

Kuvissa 17...20 on esitetty 550 m korkeudesta otetuilta väridiapositiivi- ja värinegatiivifilmeiltä vihreällä ja punaisella suotimella mitatut filmien tiheydet ja vastaavilla paikoilla olleet vedensyvyudet. Kuviin on piirretty silmävaraisesti käyrät, jotka osoittavat veden syvyyden ja filmien tiheyden välistä keskimääräistä riippuvuutta. Poikkeamat käyrästä aiheutuvat pohjan laadusta, vesikasvillisuudesta sekä mitatun kohteen asemasta aurinkoon ja kameraan nähden.

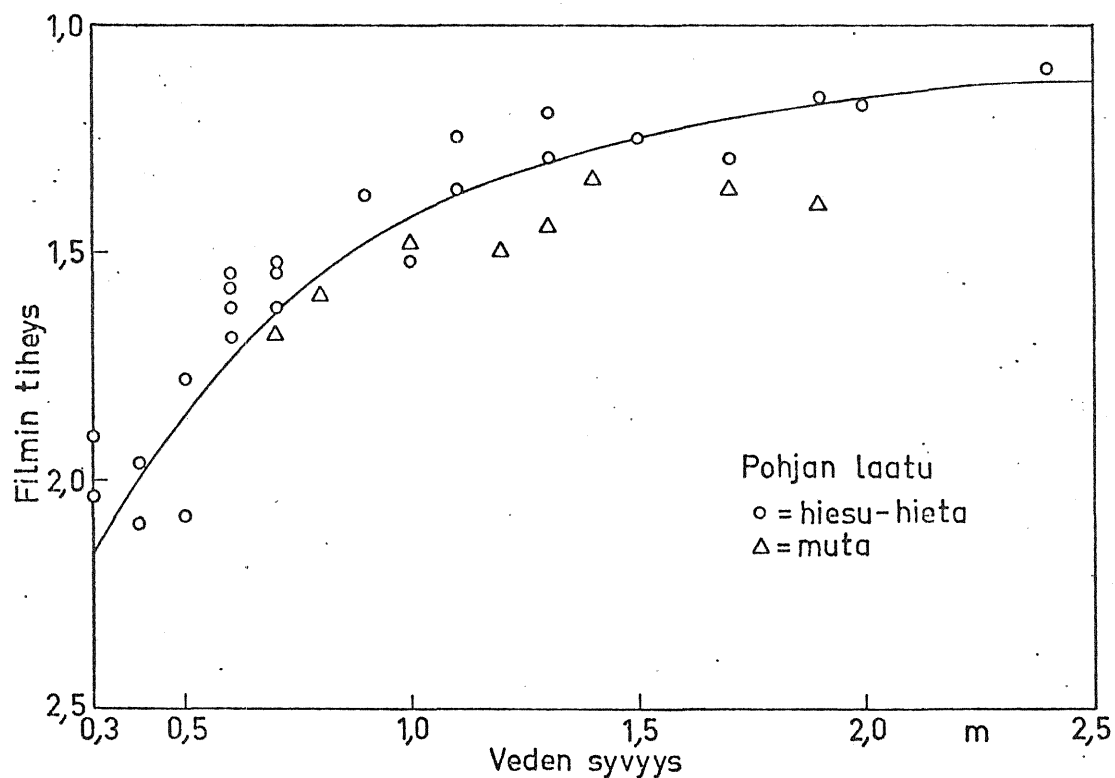
Kuvissa 21 ja 22 on esitetty edellä mainituilta kuvilta Wratten 98 suotimella mitatut filmien tiheydet. Kuviin on silmävaraisesti piirretty käyrät, jotka osoittavat veden syvyyden ja filmien tiheyden välistä keskimääräistä riippuvuutta. Vihreä ja punainen emulsiokerros antavat valtaosan veden syvyyttä kuvaavasta informaatiosta.



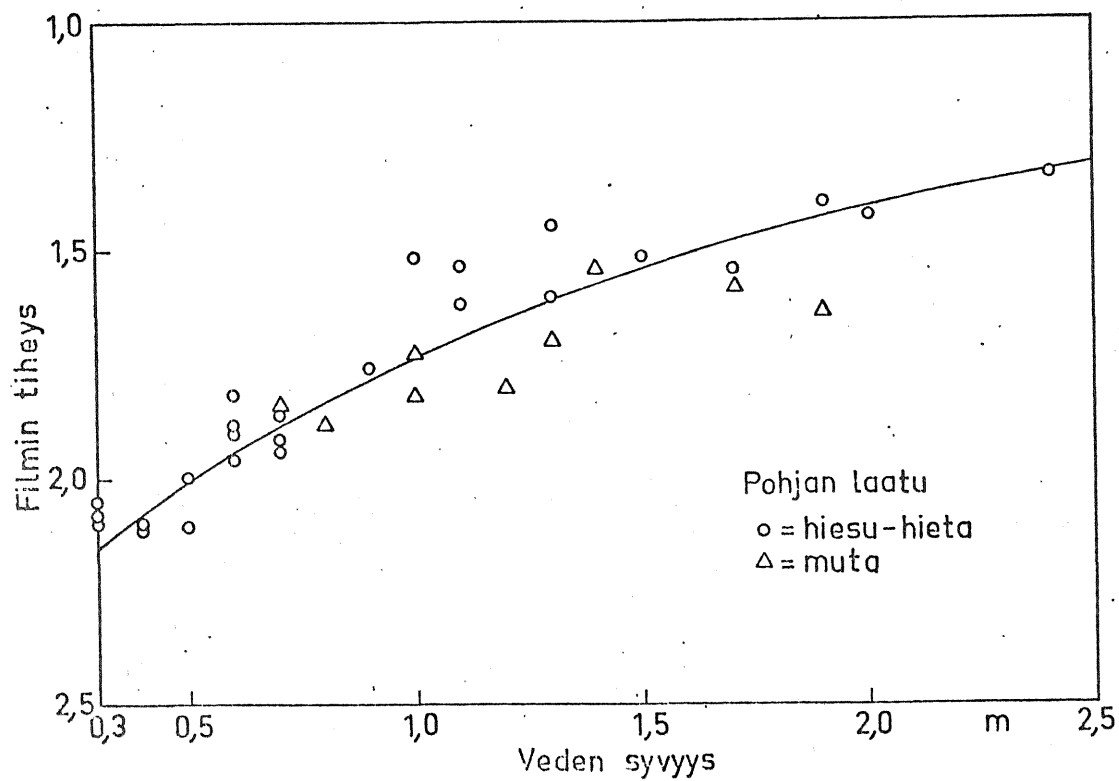
Kuva 17. Punaisella suotimella, Wratten 92, mitattu väridiapositiivifilmin tiheys ja vastaava veden syvyys. Kuvauskorkeus 550m.



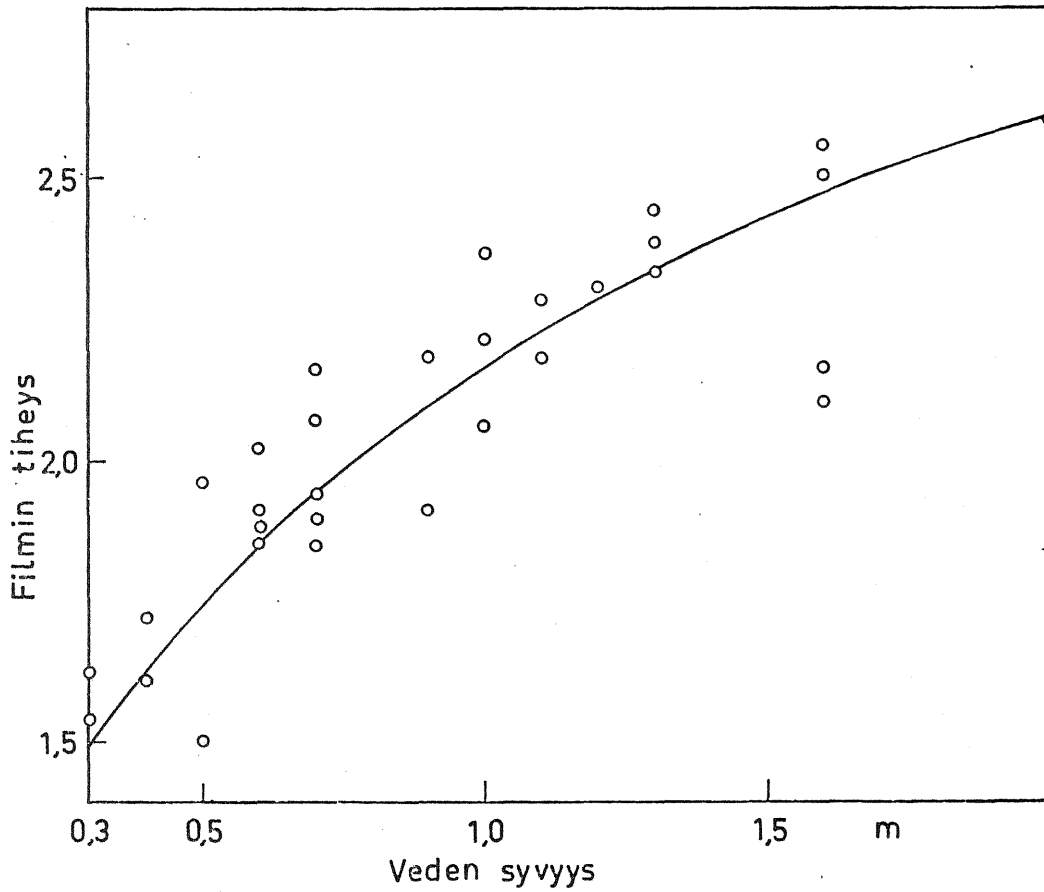
Kuva 18. Vihreällä suotimella, Wratten 93, mitattu väridiapositiivifilmin tiheys ja vastaava veden syvyys. Kuvauskorkeus 550m.



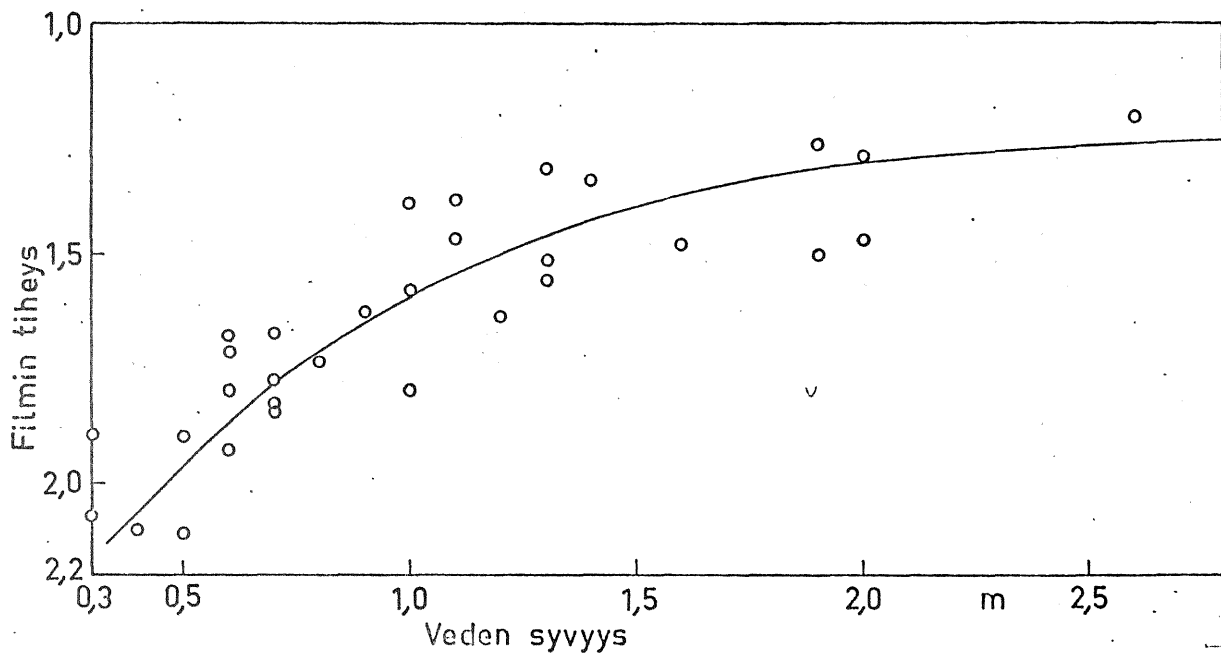
Kuva 19. Vihreällä suotimella, Wratten 93, mitattu värinegatiivifilmin tiheys ja vastaava veden syvyys. Kuvauskorkeus 550m.



Kuva 20. Punaisella suotimella, Wratten 92, mitattu värinegatiivifilmin tiheys ja vastaava veden syvyys. Kuvauskorkeus 550 m.



Kuva 21. Koko näkyvän spektrin alueen mittaavalla suotimella, Wratten 106, mitattu värinegatiivifilmin tiheys ja vastaava veden syvyys. Kuvauskorkeus 550 m.



Kuva 22. Koko näkyvän spektrin alueen mittaavalla suotimella, Wratten 106, mitattu värinegatiivifilmin tiheys ja vastaava veden syvyys. Kuvauskorkeus 550 m.

5.2 SYVYYSKÄYRÄN TULKITSEMINEN ILMAKUVALTA

Liitteenä olevassa kartassa on kuvattu kenttämittausten sekä kuvatulkinnan avulla saatu 1.5 m syvyyskäyrän sijainti. Käyrän sijainti on tulkittu autografissa. Käytetyt filmit ja niiden mittakaavat olivat seuraavat:

filmin tyyppi	kuvan mittakaava	kuvankorkeus (m)
Water Penetration	1:22000	3450
väridiapositiivi	1:15000	3150

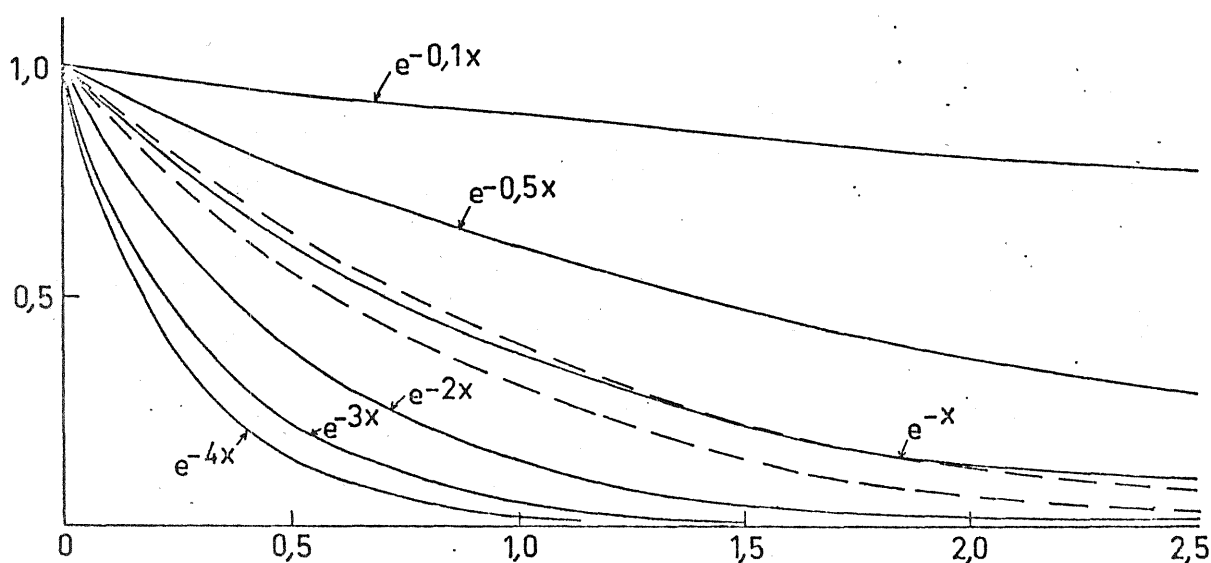
6. TULOSTEN TARKASTELU

6.1 VEDEN VALONLÄPÄISEVYYS, POHJA JA VESIKASVILLISUUS

Filmiltä mitattu tiheys on filmityyppistä riippuen suoraan tai kääntäen verrannollinen filmille tulleen valotuksen määrään. Koska filmin mustumakäyrässä (kuva 11) kohteen kuvautuminen yleensä sattuu käyrän lähes suoralle osalle, kuvastavat mitatut tiheydet hyvin valotuksen määrää.

Kuvassa 23 on esitetty yhtälön (5) kuvaajia kun $E_0(\lambda) = 1.0$. Koska valo joutuu kahdesti kulkemaan veden läpi, ennenkuin se voidaan mitata, on veden pinnassa säteilyvoimakkuus $E_p(\lambda)$.

$$E_p(\lambda) = E_0(\lambda) e^{-2k(\lambda)x} \quad (9)$$



Kuva 23. Yhtälön $E_p(\lambda) = E_0(\lambda) e^{-2k(\lambda)x}$ kuvaajia eri $k(\lambda)$ arvoilla. Mitatut ilmakuvioiden tiheydet osoittavat, että Suontien-
selällä säteilyn vaimeneminen tapahtuu katkoviivojen välisellä
alueella.

Kun otetaan huomioon kuvilta mitatut keskimääräiset paljaan maan heijastuman säteilyn aiheuttamat filmien tiheydet, saadaan kuvassa 23 katkoviivalla esitetty käyrä kuvaamaan säteilyn keskimääräistä vaimenemista veden syvyyden funktiona. Tulosta voidaan pitää ainoastaan suuntaa-antavana, sillä filmien avulla epäsuorasti mitattu säteilyn vaimeneminen on epätarkkaa. On ilmeistä, että erilaisille järvityypeille, jopa eri järville saadaan erilaiset kuvaajat $E_p(\lambda)$:lle. Elomaan /6/ tulokset tukevat tätä ajatusta. Tässä yhteydessä tätä ei ollut mahdollista tutkia, koska muut kuvausalueella olevat järvet ovat rannasta asti niin syviä, että järven pohja ei näy pinnalle. Oman ongelmansa syvyyden määrittämiselle muodostaa pohja, koska samassa järvessä esiintyy heijastussuhteiltaan erilaisia pohjatyyppejä. Tässä tutkimuksessa oli tutkittavissa vain kahdentyyppisen pohjan, mutapohjan ja hietta-hiesupohjan vaikutus mittauksittain. Jatkotutkimuksissa on tehtävä mittauksia myös muunlaisilta pohjatyypeiltä, jotta saadaan mahdollisimman hyvä yleiskäsitys pohjan vaikutuksesta. Kasvillisuus haittaa useasti pohjan näkymistä. Syvyyksien tulkintaa ajatellen tilanne on kuitenkin sellainen, että harvoin pintaan ulottuvaa kasvillisuutta esiintyy yli 1.5 m syvyisillä alueilla. Näin ollen tällaisilla alueilla voidaan 1.5 m käyrän sijainnin määrittäminen tehdä suhteellisen luotettavasti kasvillisuusrajan mukaan.

6.2

FILMITYYPIT, KUVAUSTAPA JA KUVAUSAIKA

Syvyyksiä autografissa tulkittaessa olivat molemmat filmilaadut tuloksiltaan lähes yhtä hyviä. Kuitenkin on todettava, että värinegatiivifilmillä oli helpointa havaita syvyyden muuttuminen, koska syvä vesi kuvastuu vaaleana. Näin aina muodostuu helposti havaittava kontrasti matalan ja syvän alueen välille. Matalalta (550 m) tehdyissä kuvauksissa (kuvat 17... 22) havaitaan, että värinegatiivifilmi antaa hieman paremman kuvan yli 1.3 m syvyisistä alueista kuin väridiapositiivifilmi. Syynä ilmeisesti on edellä mainittu kontrastin paremmuus värinegatiivifilmillä, sillä filmien emulsiokerrosten spektriset herkkyydet eivät sanottavasti poikkea toisistaan.

Kuten jo kohdassa 2 esitettyjen tulosten perusteella voidaan havaita, keltasuotimen käyttö parantaa pohjan näkyvyyttä. Vaikka tässä kokeilussa ei ollut mahdollisuuksia erilaisten suodinten käyttöön samanaikaisesti ja näin vertailujen tekemiseen, saattaa jatkotutkimuksissa olla hyödyllistä tutkia vielä voimakkaampien keltasuotimien käyttöä. Keltasuotimen käyttö aiheuttaa myös sen, että korkealta saadaan kontrastiltaan hyviä värikuvia, koska ilmakehän säteilyä vaimentava vaikutus on pitempiaaltoisen säteilyn alueella pienempi kuin lyhytaaltoisen säteilyn alueella.

Paras kuvausajankohta sattuu sisävesillä keskikesäksi, koska tällöin vesi on yleensä kirkkaampaa kuin keväällä ja syyskesällä.

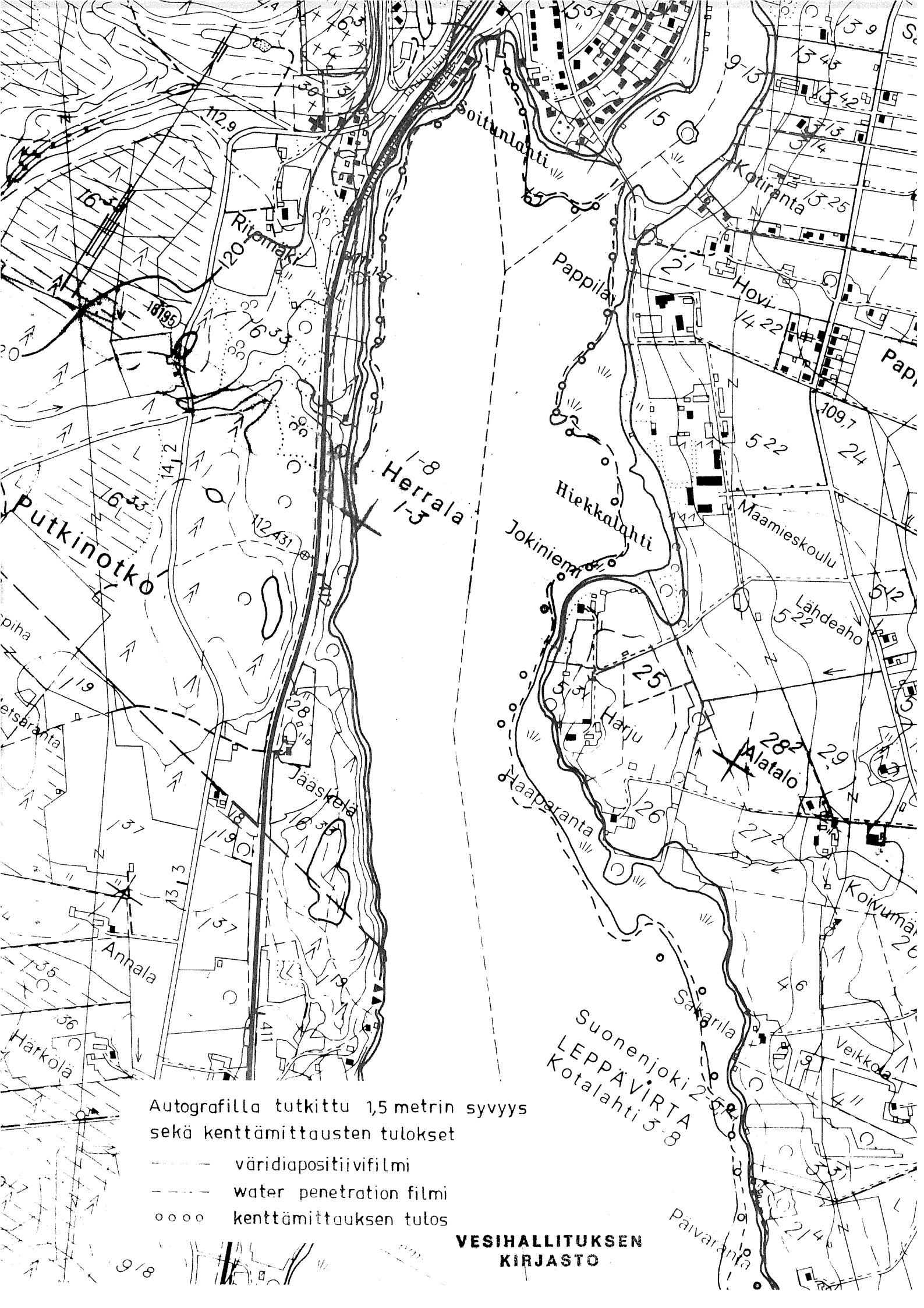
6.2

MENETELMÄN SOVELTUVUUDESTA SUOMEN OLOIHIN

Edellä selostettujen tulosten perusteella voidaan todeta, että ilmakuvien avulla voidaan selvittää vesistöjen syvyyssuhteita näkösyvyyden sallimisrajoissa. Tämä merkitsee noin 0.4...2.5 metrin syvyyttä maamme sisävesillä. Pohjan näkyminen riippuu kuitenkin suuresti pohjan laadusta. Vaaleat pohjat näkyvät luonnollisesti parhaiten. Syvyyden määrittämistarkkuuden mittaamiseksi tarvitaan kuitenkin vielä lisäselvityksiä. Sama koskee menetelmän käytön saattamista rutiininomaiseksi. Näiden jatkoselvitysten valmistuttua sekä värikuvilta tapahtuvan fotogrammetriseen pistetihennyksen tarkkuuden selvittyä jatkotutkimuksissa voidaan lopullisesti arvioida myös menetelmän taloudelliset käyttömahdollisuudet.

LÄHDELUETTELO

- /1/ Wetzell, 1975. Limnology.
- /2/ Möller, Sven G., 1969. Flygbildtolkning som teknik och vetenskap. INSKO:n julkaisu 1-69. Ilmakuvien tulkinta.
- /3/ Specht, M. R. et al, 1973. New Color Film for Water Penetration Photography. Photogrammetric Engineering. Vol. 39.
- /4/ Manual of Remote Sensing, 1974. The American Society of Photogrammetry.
- /5/ Niemi, Åke, Näkösyyvyys rannikkovesissämmme.
- /6/ Elomaa, Esko, 1977. A comparison of the penetration of global short wave radiation into four finnish lakes. Joensuun korkeakoulun julkaisuja, sarja B_{II} n:o 7. Joensuu.
- /7/ Järnefelt, H., 1963. Zur Limnologie einiger Gewässer Finnlands XX. Zusammenfassende Besprechung der Thermik und Chemie Finnischer Seen. Ann. Zol. Soc. Vanamo 25:1.
- /8/ Keller, Morton, 1975. Aerial Photography in the NOS Coastal Mapping Division. Photogrammetric Engineering Vol. 41.
- /9/ Lockwood, H. E. et al. 1974. Water Depth Penetration Film Test. Photogrammetric Engineering Vol. 40.
- /10/ Rosenshein, J. S. et al. 1977. Bottom Configuration and Environment of Tampa Bay. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Vol. 43.
- /11/ Granath, Lars G. W. 1978. Mapping of water depths in shallow waters using air photo interpretation. IX ICA Conference of Cartography.



Autografilla tutkittu 1,5 metrin syvyys
sekä kenttämittausten tulokset

- väridiapositiivifilmi
- - - water penetration filmi
- oooo kenttämittauksen tulos

VESIHALLITUKSEN
KIRJASTO

